

铯原子激发能级超精细结构常数的测定*

周志尧 朱利洲 景春阳 张峭峰 林福成

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

提 要

用铯空心阴极灯, 采用光电流光谱技术测得铯原子 21 条一级跃迁谱线, 确定了相应跃迁上能级的超精细结构常数, 其中 7 个能级的参数为首次发表, 运用同一空心阴极灯, 采用双色双光子级联共振技术, 由荧光法首次测得 4 个第二激发能级的超精细结构常数.

关键词 铯空心阴极灯, 双色双光子级联共振, 超精细结构.

1 引 言

有关铯超精细结构谱的研究从 60 年代已开始, 最早由 Ritter^[1] 用原子束磁共振法测得基态的超精细结构常数, 其值为 -374.1374 ± 0.0016 MHz. 之后 Bordarier 等人^[2] 以空心阴极灯作光源, 用法布里-珀罗光谱仪测了 70 多条铯的谱线, 但仅有少数显示出超精细结构, 到 70 年代 Kuhl^[3], Brandt^[4] 等人用传统的吸收光谱法及 Handrich^[5], Wallenstein^[6] 等人用能级交叉法测定了 50 多条铯原子能级的超精细结构常数, 但这类方法仅能应用于光强较强的谱线. 本工作用铯空心阴极灯, 采用光电流光谱技术测定了 21 条一级跃迁谱, 确定了相应跃迁上能级的超精细结构常数, 同时采用双色双光子级联共振技术, 用荧光探测法测定了 4 个第二激发能级的超精细常数, 有关原子超精细结构的论述请参看文献^[7].

2 实验条件

图 1 是测定铯原子光电流谱实验装置的框图, 铯空心阴极灯系自制, 阴极由内径为 3 mm 的筒形铯金属插入镍套制成, 灯中充约 300 Pa 的氩气, 工作电流 10 mA, 串接电阻 15 k Ω , 激发的连续激光经透镜聚焦后经窗口射入阴极孔内. 激光由 3 W 氩离子激光器泵浦的环形连续染料(若丹明 6G)激光器产生, 波长调节范围从 560 到 600 nm, 输出功率最大值为 100 mW, 线宽 1 MHz, 可在 30 GHz 范围内连续扫描, 激光波长由六位数字波长计测量, 稳频和扫描情况由扫描干涉仪经示波器显示, 扫描干涉仪的自由光谱区为 2 GHz, 激光束由频率为 130 Hz 的斩波器调制, 当激光波长调节到与铯原子能级间跃迁波长共振时, 空心阴极灯的等效阻抗发生变化, 和这变化相应的电压信号输入锁相放大器放大, 为使锁相放大器正常工作, 还需从斩波器输入一个 130 Hz 的参考信号, 锁相放大器的输出由 X-Y 记录仪记录. 为对谱线作频率标定, 部分激光通过另一固定干涉仪后由光电管接收并将电信号输入同一 X-Y 记录仪, 此干涉仪的

收稿日期: 1992 年 10 月 7 日

* 本工作由国家自然科学基金资助.

自由光谱区为 301 MHz.

双色双光子级联共振实验的装置框图如图 2 所示. 它在图 1 所示的装置中加入了第二组激光器——4 W 的氩离子激光器泵浦另一台环形连续染料(若丹明 6 G)激光器, 其激光波长范围为 565~605 nm, 最大输出功率为 80 mW, 线宽为 10 MHz, 在环形腔内插入由压电陶瓷控制的干涉仪, 改变加于压电陶瓷上的电压, 可使其工作频率间断地跳变 200 MHz 的整倍数, 其跳变情况由扫描干涉仪进行监测, 二束波长不同的激光相向传输, 分别经空心阴极灯的二个布儒斯特窗穿过灯阴极孔前的原子蒸汽区, 为减少由灯发射谱引起的背景噪声, 在垂直于阴极孔方向经透镜探测感生荧光, 线状的荧光像成像于单色仪的进光狭缝上, 单色仪中光电倍增管(R456)产生的电信号输入锁相放大器. 往后的记录方式与图 1 相同, 差别只是谱线的标尺由二个自由光谱区数值不可约的二台干涉仪提供, 其值一为 2 GHz, 一为 301 MHz, 目的是为了当二台激光器的频率都改变时, 便于判别不同的超精细结构谱分量.

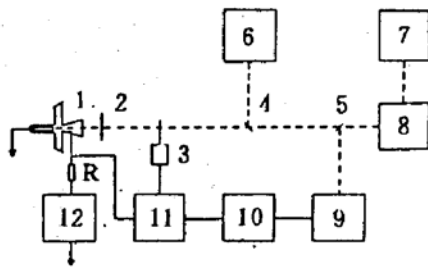


Fig. 1 Experimental arrangement for measurement of optogalvanic spectroscopy of ^{189}TmI

1—hollow cathode discharge lamp(HCD), 2—lens, 3—chopper, 4,5—beamsplitter, 6—wavelength meter, 7—Ar⁺ laser 8—dye, laser, 9—Febry-Perot etalon, 10—X-Y recorder, 11—lock-in amplifier, 12—HCD power supply

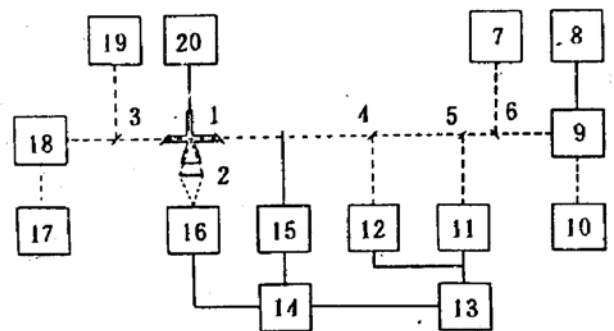


Fig. 2 Experimental arrangement for measurement of high excited levels of ^{169}TmI

1—HCD, 2—lens, 3, 4, 5, 6—beam splitter, 7—wavelength meter, 8—controller 9—dye laser 2, 10—Ar⁺ laser 2, 11, 12—Febry-Perot etalon, 13—X-Y recorder, 14—lock-in amplifier, 15—chopper, 16—monochromometer, 17—Ar⁺ laser 1, 18—dye laser 1, 19—scanning interferometer, 20—HCD power supply

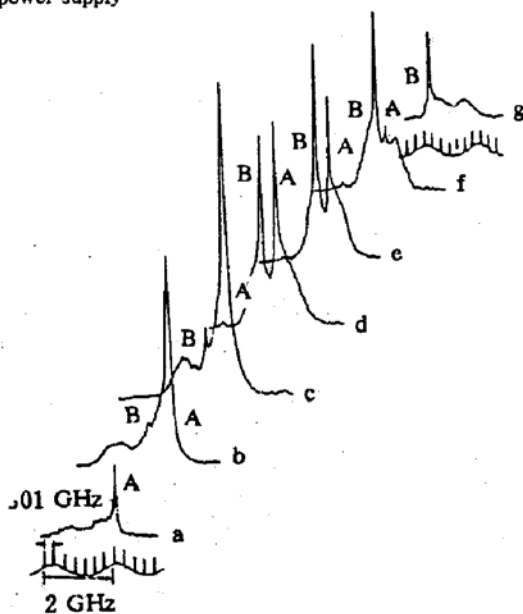


Fig. 3 A typical HFS pattern for the two-photon excited of ^{169}TmI

$0\text{ cm}^{-1} \rightarrow 16957.01\text{ cm}^{-1} \rightarrow 34365.63\text{ cm}^{-1}$

Frequency of the first laser was changed by -400 MHz/step around 589.563 nm and scanning that of the second laser at every step through the HFS components of 574.272 nm . $\lambda_1 = 470.546\text{ nm}$

简要的实验步骤为先将 1 号染料激光器的波长调整到第一级共振跃迁边缘的某一超精细结构谱分量处, 然后将 2 号染料激光器的波长调整第二跃迁的共振值附近并连续扫描通过共振区,

这时由单色仪测得由第二激发态向下跃迁的荧光信号,其波长是根据铥原子能级表经计算机计算后得知.这样就获得相应于第一级跃迁谱中某一超精细结构分量上的第二级级联跃迁的曲线,之后 1 号激光器的频率每次改变 400 MHz 扫过第一级跃迁的共振区,对应于 1 号激光器频率的每次变动,2 号激光器的波长都扫过第二级跃迁的共振区一次,经过多次扫描,我们就获得第二级跃迁超精细结构谱的完整曲线,其典型结果如图 3 所示.

3 结果与讨论

实验运用图 1 所示的装置对铥原子 2 eV 附近的第一激发能级测得了 21 条光电流光谱.其典型的谱如图 4 所示,由测得的谱图,计算了相应跃迁上能级的超精细结构常数 A,其结果列于表 1,在计算过程中由于绝大多数谱线的 4 个超精细分量中两侧分量的强度太弱,不易测得或确定峰值位置,所以只得运用已知下能级的 A 常数来作计算,实际上实验中测得了 36 条铥原子的一级光电流光谱,但其中 15 条由于超精细结构谱的分量分不开或信号太弱而无法运用,对于现有的空心阴极灯结构无法消除多普勒线宽,实际上其数值很大,典型的半高全宽值为 0.9 GHz(见图 4),因而若要作进一步测量,现有的空心阴极灯结构有待改进.

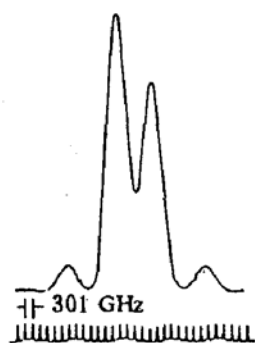


Fig. 4 Typical optogalvanic spectra of ^{169}TmI $\lambda_p = 576.021 \text{ nm}$

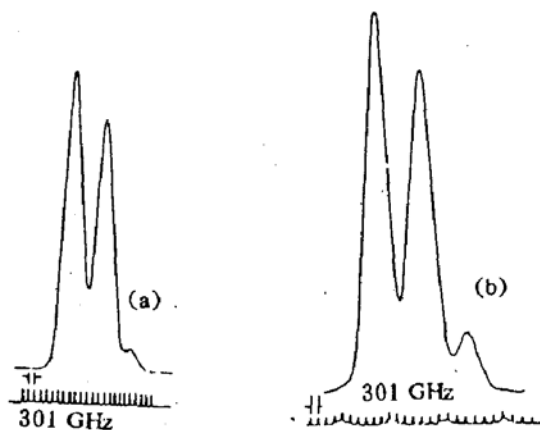


Fig. 5 A comparison of optogalvanic spectra and fluorescence spectra of ^{169}TmI
(a) optogalvanic spectra, $\lambda_p = 567.584 \text{ nm}$ (b) fluorescence spectra $\lambda_f = 576.429 \text{ nm}$

在实验中,我们同时测定了 567.584 nm, 576.429 nm, 589.563 nm, 597.126 nm, 571.582 nm 等 5 条谱线的感生荧光谱,图 5 给出了 567.584 nm 跃迁的光电流谱及感生荧光谱,由图可见荧光谱的分辨率略高于光电流光谱的结果.

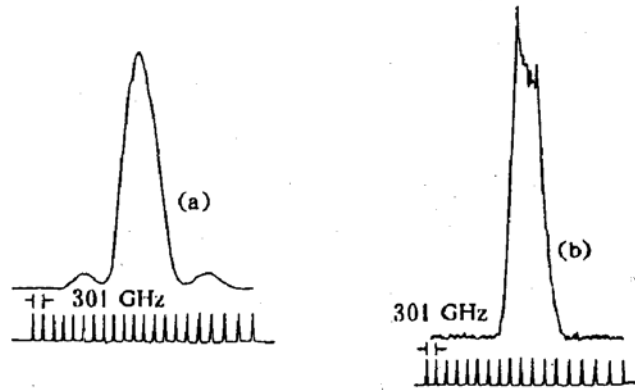
为进行双色双光子级联共振实验,实验首先测定了铥原子 $0 \text{ cm}^{-1} \rightarrow 16957.01 \text{ cm}^{-1}$ 跃迁($\lambda = 589.563 \text{ nm}$)的消多普勒谱,方法是将同一激光分成二束,再相向射入空心阴极灯内,改变激光波长而获得窄的二个超精细结构谱的分量,如图 6(b)所示,其宽的背景是由剩余的多普勒效应引起,在图 6(a)中给出了相同跃迁的光电流谱,原在图 6(b)中的两个超精细结构谱分量未能分出,而两侧两个小强度超精细结构谱分量则明显,由这两曲线,求得 16957.01 cm^{-1} 能级的 A 常数为 $-491.57 \pm 0.20 \text{ MHz}$,此值为确定第二激发能级的超精细结构常数提供了参数.

Table 1 Transition level and its A constant of Tm

wavelength (nm)	configuration	low level (cm^{-1})	J	A (MHz) (other work) ref	configuration	up level (cm^{-1})	J	A (MHz) (other work) ref	A (MHz) (this work)
565.483	$4f^{12}5d_{3/2}6s^2$	15271.00	7.5	-345.10(25) *	$4f^{12}5d_{6s}6p$	32950.10	6.5	-654.83(43) *	-657.00 \pm 0.65
565.830	$4f^{13}6s^2$	8771.24	2.5	-704.76 \pm 0.39 # -704.8 \pm 0.10 @ -0.706.0(4.5) \$	$4f^{13}6s6p$	26439.49	3.5	-908.42 \pm 0.30 # -909.02 \pm 0.3 @ -908.3(1.1) \$	-904.98 \pm 1.00
567.584	$4f^{13}6s^2$	0	3.5	-374.137661(3)&	$4f^{13}6s6p$	17613.66	4.5	-629.25 \pm 0.08 # -629.4 \pm 0.9 \$ -629.2(0.4) @	-630.52 \pm 0.60
568.359	$4f^{12}5d_{5/2}6s^2$	16456.91	8.5	-308.82(21) *	$4f^{12}5d_{6s}6p$	34046.54	7.5	-513.08(40) *	-512.54 \pm 0.50
571.519	$4f^{12}5d_{5/2}6s^2$	18837.38	4.5	-422.7 \pm 0.9 \$	$4f^{12}5d_{6s}6p$	36329.79	5.5	---	-71.22 \pm 0.10
571.579	$4f^{12}5d_{3/2}6s^2$	15271.00	7.5	-345.10(25) *	$4f^{12}5d_{6s}6p$	32761.54	8.5	-421.12(95) *	-420.50 \pm 0.20
571.711	$4f^{12}5d_{5/2}6s^2$	18693.07	7.5	-323.81(33) *	$4f^{12}5d_{6s}6p$	36179.60	7.5	---	-436.03 \pm 0.50
574.270	$4f^{12}5d_{5/2}6s^2$	16957.01	3.5	-491.45(7) *	$4f^{12}5d_{6s}6p$	34365.63	3.5	---	-318.37 \pm 0.35
575.802	$4f^{12}5d_{3/2}6s^2$	15537.81	5.5	-390.38(31) *	$4f^{12}5s_{6s}6p$	32950.10	6.5	-654.83(43) *	-657.00 \pm 0.65
576.020	$4f^{13}6s^2$	8771.24	2.5	-704.8 \pm 0.10@	$4f^{13}6s6p$	26126.91	2.5	-1160.39 \pm 0.40 # -1185 \$	-1161.47 \pm 1.20
579.671	$4f^{13}6s6p$	17752.63	2.5	-235.69 \pm 0.21 # -235.5 \pm 1.5 \$ -235.5(10)@	$4f^{13}5d_{6s}$	34999.01	1.5	---	-865.24 \pm 0.90
581.646	$4f^{12}5d_{5/2}6s^2$	16456.91	8.5	-308.82(21) *	$4f^{12}5d_{6s}6p$	33644.74	9.5	---	-482.64 \pm 0.50
588.980	$4f^{13}6s^2$	8771.24	2.5	-704.8 \pm 0.10@	$4f^{13}6s6p$	25745.12	2.5	-540 \$	-439.38 \pm 1.00
589.563	$4f^{13}6s^2$	0	3.5	-374.137661&	$4f^{12}5d_{5/2}6s^2$	16957.01	3.5	-491.50 \pm 0.09 # -492.3 \pm 2.7@ -491.1(1.0)@	-491.55 \pm 0.10
590.157	$4f^{12}5d_{5/2}6s^2$	18693.07	7.5	-323.81(33) *	$4f^{12}5d_{6s}6p$	35633.01	8.5	-519.32(36) *	-518.67 \pm 0.55
952.086	$4f^{13}6s^2$	8771.24	2.5	-704.8 \pm 0.10@	$4f^{13}6s6p$	25656.02	2.5	-461 \$ -410.7(1.4) @	-464.00 \pm 1.00
593.489	$4f^{12}5d_{5/2}6s^2$	18837.38	4.5	-422.7 \pm 0.9 \$	$4f^{12}5d_{6s}6p$	35682.25	3.5	---	-152.00 \pm 0.20
593.590	$4f^{12}5d_{3/2}6s^2$	15271.00	7.5	-345.10(25) *	$4f^{12}5d_{6s}6p$	32112.98	7.5	-137.26(22) *	-138.09 \pm 0.20
597.126	$4f^{13}6s^2$	0	3.5	-374.137661&	$4f^{13}6s6p$	16742.24	3.5	-736.91 \pm 0.30 # -738 \$ -736.6(10) @	-735.40 \pm 0.20
598.174	$4f^{12}5d_{5/2}6s^2$	19466.66	6.5	-342.76(34) *	$4f^{12}5d_{6s}6p$	36179.60	7.5	---	-436.03 \pm 0.50
602.544	$4f^{12}5d_{3/2}6s^2$	17454.82	6.5	-365.83(62) *	$4f^{12}5d_{6s}6p$	34046.54	7.5	-513.08(40) *	-512.54 \pm 0.50

* ref[10], # ref[8], @ ref[9], \$ ref[4], & ref[11]

运用图 2 所示的装置,采用双色光子级联共振法测得在 4 eV 附近第二激发能级的超精细结构谱. 所得的典型谱图如图 3 所示. 其相应的跃迁是 $0 \text{ cm}^{-1} \rightarrow 16957.01 \text{ cm}^{-1} \rightarrow 34365.63 \text{ cm}^{-1}$, 探测荧光波长为 470.546 nm. 图中相邻曲线的跳变对应于 1 号激光器的频率改变 400 MHz. 每条谱线上的 A, B 峰只是 4 个超精细结构分量中的 2 个强分量, 其它 2 分量淹没在噪声中. 根据 A, B 分量的间隔, 再运用下能级的 A 常数, 可以求得第二高激发态的 A 常数. 从图 3 的各条曲线中清楚地看出, 由于双色激光相向的射入空心阴极灯中, 因而获得比一级荧光谱更窄的消多普勒谱, 其典型的线型宽为 90 MHz. 同时还出现二个宽的背景峰, 并且在标尺上的位置不变, 其原因首先是由于铥原子 16957.01 cm^{-1} 能级的寿命很长, 约 1400 ns^[6], 因此原子在此能级上停留时间较长, 其次是由于铥灯放电时, 放电区温度达 700°C 左右, 加上灯中充有

Fig. 6 Optogalvanic spectra and doppler-free spectra of ^{169}TmI (a) optogalvanic spectra $\lambda_p = 589.563 \text{ nm}$ (b) Doppler-free spectra $\lambda_p = \lambda_f = 589.563 \text{ nm}$

300 Pa 氮气,使得铥原子和氮原子间存在剧烈碰撞,这种高温和剧烈碰撞使得由第一级激光激发到某一超精细结构能级上的原子数在能级寿命时间内很快和其它子能级上的原子数达到平衡,这时若 2 号激光器在第二级共振区作波长扫描,则描绘出第一激发能级和第二激发能级间的超精细结构谱.

表 2 列出了同一第一级荧光激发后的 4 个不同的第二级激发波长,同时列出了相应第二激发能级,探测荧光波长及光跃迁的下能级.和图(3)574.272 nm 的谱线一样,表中其它三个波长的曲线组亦都具有宽的背景峰.

Table 2 Transition wavelength and levels of two color two photon of ^{169}TmI $\lambda_{p1} = 589.563 \text{ (nm)} [0(3.5) \rightarrow 16957.01 \text{ cm}^{-1} (3.5)]$

Wavelength of second excited laser (nm)	Levels of second excited (cm^{-1})	Configuration	J	Wavelength of fluorescence (nm)	Low levels of fluorescence transition (cm^{-1})	Configuration	J
571.244	34457.85	$4f^{12}5d6s6p$	4.5	640.673	18853.82	$4f^{12}5d5/26s^2$	5.5
574.272	34365.63	$4f^{12}5d6s6p$	3.5	470.545	13119.61	$4f^{12}5d3/26s^2$	4.5
579.984	34194.09	$4f^{12}5d6s6p$	2.5	572.900	16742.24	$4f^{13}6s6p$	3.5
587.933	33961.04	$4f^{13}6s7s$	3.5	661.034	18837.38	$4f^{12}5d5/26s^2$	4.5

通过分析,可得到在相向传输的双色激光形成级联共振时,由于第一和第二级激发波长 $\lambda_1 \neq \lambda_2$,对测得的第二激发能级的超精细结构谱间隔值需作以下修正

$$\Delta v = (1 - \lambda_1/\lambda_2)\Delta v_1$$

其中 Δv_1 是由基态到第一激发能级单光子跃迁的多普勒线宽,作了以上修正后,求得相应 4 组双色双光子共振级联跃迁的第二激发能级的 A 常数.具体数值见表 3,后二行数据误差较大的原因是较差的信号噪声比.

Table 3 Hyperfine structure constants of high level of ^{169}TmI

Configuration	J	Level (cm^{-1})	A constant (MHz)
$4f^{13}6s7s$	7/2	33961.044	-313.0 ± 1.0
$4f^{12}5d6s6p$	5/2	34194.09	-197.7 ± 1.0
$4f^{12}5d6s6p$	7/2	34365.63	-278.1 ± 3.0
$4f^{12}5d6s6p$	9/2	34457.853	-416.0 ± 5.2

实验中在若丹明 6G 的谱区范围内(560~610 nm),普查了铥原子的双色双光子级联共振谱线,但就目前所具备的实验条件,仅测得以上 4 个第二激发能级的谱线,因而实验具有较大的难度,并有待于进一步改善.

作者感谢姜士杰同志在制作空心阴极等给予的帮助.

参 考 文 献

- [1] G. J. Ritter, Ground-state hyperfine structure and nuclear magnetic of thulium-169. *Phys. Rev.*, 1962, **128**(5): 2238
- [2] Y. Bordor, P. Vetter, J. Blaise, *J. Phys(paris)*, 1963, **24**: 1107
- [3] J. Kuhl, Hyperfeinstruktuntersuchungen mit einem spharischen Fabry- Perat- Interferometer mit internem absorptionsatomstrahl im TmI und EuI spektrum. *Z. Physik*, 1971, **242**: 66
- [4] H. W. Brandt, P. Camus, Recent hyperfine structure investigation in the configurations $4f^{13}6s^2$, $4f^{13}6s6p$, and $4f^{12}5d6s^2$ of TmI. *Z. Physik*, 1977, **A283**: 309
- [5] E. Handrich, A. Steudel, R. Wallenstein *et al.*, *J. Phys. Radium*, 1969, **30**: C1~18
- [6] R. Wallenstein, Levelcrossing experimente im TmI-Spektrum. *Z. Physik*, 1972, **251**: 57
- [7] 周志尧, 朱利州, 瞿佳男等, 用荧光法在空心阴极灯中测定镱原子的超精细结构谱. *光学学报*, 1992, **12**(3): 242
- [8] K. A. H. Van Leeuwn, E. R. Elliel, W. Hogervorst, High resolution meaurments of the hyperfine structure in 10 levels of TmI. *Phys. Letters*, 1980, **78A**(1): 54
- [9] W. J. Childs, H. Crosswhite, L. S. Giidman *et al.*, Hyperfine structure of $4f^N6s^2$ configurations in ^{169}Tb , $^{161-163}\text{Dy}$, and ^{169}Tm . *J. Opt. Soc. Am. (B)*, 1984, **1**(1): 22
- [10] V. Pfeufer, Hyperfine structure investigations in the configuration $4f^{12}5d6s^2$ of TmI by laser-atomic beam spectroscopy. *Z. Physik(A)-Atoms and Nuclei*, 1985, **321**: 83
- [11] P. Dyer, J. A. Bounds, Laser spectroscopy of ^{170}Tm . *Phys. Rev(C)*, 1988, **38**(6): 2813

Measurement of hyperfine structure constant of high excited levels in ^{169}TmI

ZHOU Zhiyao ZHU Lizhou JING Chunyang
ZHANG Shaofeng LIN Fucheng

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica, Shanghai 201800)

(Received 7 October 1992)

Abstract

With a Tm-Kr hollow cathode discharge (HCD) lamp, we measured 21 transition lines of ^{169}TmI by optogalvanic spectroscopy and determined the hyperfine structure constants of the upper levels, among them, seven are firstly reported to our knowledge. With the same HCD, the hyperfine structure constants of four excited levels are measured. by two-color resonance.

Key words Tm hollow cathode discharge lamp, series resonance of two color, hyperfine structure